

УДК 535.317; 621.283.4/5

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ ДИАФРАГМАМИ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРАХ

© А. Р. Новоселов, П. А. Алдохин, П. П. Добровольский,
А. В. Гусаченко, Б. Н. Новгородов, К. П. Шатунов, С. М. Чурилов

*Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1
E-mail: novoselov@oesd.ru*

Исследовано отражение инфракрасного излучения покрытиями диафрагм в фотоприёмных устройствах тепловизионных приборов: чёрной полимерной краской, анодным окислом, травлёным коваром, взвесью графита или окиси титана в криогенностойком лаке и др. Выяснены спектры и интегральные коэффициенты отражения покрытиями диафрагм в диапазоне длин волн 2–14 мкм при углах падения излучения 15 и 45°. Также изучены в спектральных диапазонах 3,4–4,8 и 7,5–13,5 мкм уровни отражённого инфракрасного излучения в широком диапазоне углов от 0 до 80° при угле падения излучения около 15°. По результатам исследований определено, что наименьший уровень отражения ИК-излучения имеет покрытие из взвеси графита в криогенностойком лаке (разработанном в филиале ИФП СО РАН «КТИПМ», г. Новосибирск). Интегральные коэффициенты отражения для данного покрытия составили 3,98 % (в спектральном диапазоне 3–5 мкм) и 5,69 % (в диапазоне 8–12 мкм).

Ключевые слова: фотоприёмные устройства, криостат, инфракрасное излучение.

DOI: 10.15372/AUT20210313

Введение. Основой тепловизионного прибора является охлаждаемый фотоприёмник, например гибридная сборка матрицы фоточувствительных элементов и кремниевого мультиплексора. Фотоприёмник установлен в криостате на охлаждаемом пьедестале. Для уменьшения отражения инфракрасного излучения (ИК-излучения) от стенок криостата фотоприёмник закрыт охлаждаемой диафрагмой, внутренняя поверхность которой имеет специальное поглощающее покрытие [1]. В качестве модели, имитирующей идеально поглощающее ИК-излучение покрытия, может служить абсолютно чёрное тело (коэффициент поглощения которого равен 1), где падающее излучение полностью поглощается и спектр излучения определяется только его температурой.

Известные нам покрытия диафрагм не являются идеальными, следовательно, из-за отражения ИК-излучения от них на фотоприёмник увеличивается разность температур, эквивалентная шуму фотоприёмника.

Покрытия охлаждаемых диафрагм, кроме низкого уровня отражения ИК-излучения, должны иметь:

- стойкость к перепадам температур в диапазоне от -196 до $+120$ °С;
- высокую адгезию к материалу охлаждаемой диафрагмы (преимущественно используется ковар);
- низкое газоотделение в вакууме до 10^{-6} мм рт. ст.

Предварительные исследования спектральных характеристик разных покрытий [2] показали, что разработанное в филиале Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологическом институте прикладной микроэлектроники» покрытие на основе криогенностойкого лака с графитом удовлетворяет вышеперечис-

ленным требованиям. В данной работе продолжено сравнительное исследование покрытий диафрагм.

Цель исследования — анализ отражения инфракрасного излучения от известных покрытий диафрагм и выяснение лучшего покрытия для тепловизионных приборов. Для этого решены следующие задачи:

— исследованы спектры отражения образцов покрытий диафрагм в спектральном диапазоне 2–14 мкм;

— выяснены их интегральные коэффициенты отражения (в диапазонах 3–5 и 8–12 мкм) при углах падения излучения 15 и 45°;

— измерены уровни отражённого ИК-излучения в диапазоне углов 0–80° относительно нормали к поверхности при угле падения излучения 15° в спектральных диапазонах 3,4–4,8 и 7,5–13,5 мкм;

— проведён анализ экспериментальных результатов и определено лучшее покрытие для охлаждаемых диафрагм.

Объекты исследования. Известны покрытия, хорошо поглощающие ИК-излучение, однако сведения об использовании их в качестве покрытий диафрагм отсутствуют [3, 4], поэтому объектами исследования были фрагменты применяемых диафрагм с известными покрытиями.

1. Полимерная краска на коваре. Тип краски: ЭК-501 RAL 9005 (Россия), матовая, полуглянцевая, ТУ 2329-354-2068474-95. Графики на всех рисунках зелёного цвета.

2. Образец покрытия, полученный в 2008 г., чёрный хром (ФГУП “НТЦ «Орион»”, Россия). Подобные покрытия можно наносить на поверхность различных металлов. Покрытия имеют хорошую теплостойкость и стойкость в вакууме, а также относительно высокую износостойкость. Нанесение покрытия осуществляют электролитическим способом. Существенное влияние на отражательную способность чёрного хромового покрытия оказывает шероховатость поверхности диафрагмы.

3. Образец покрытия (2008 г.), чёрный хром (НПО «Сапфир», Россия). Способ нанесения покрытия аналогичен образцу 2.

4. Образец покрытия из взвеси окисей титана (TiO_x) в криогенностойком лаке (филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Россия). Наносится покрытие распылением мелкодисперсного порошка окиси титана с криогенностойким лаком на поверхность диафрагм. Оптимальная толщина слоя покрытия и технология нанесения и сушки является коммерческой тайной. Покрытие имеет хорошую адгезию к ковару и при многократном термоциклировании от –196 до +120 °С не изменяет своих оптических свойств. Имеет малое газоотделение при работе в высоком вакууме [2]. Графики на всех рисунках синего цвета.

5. Покрытие из взвеси графита в криогенностойком лаке (филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Россия). Формируется аналогично образцу покрытия 4. Покрытие имеет хорошую адгезию к ковару, не изменяет своих оптических свойств при многократном термоциклировании и имеет малое газоотделение при работе в высоком вакууме [2]. Графики на всех рисунках красного цвета.

6. Образец покрытия фирмы Sofradir (Франция, 2008 г.).

7. Образец диафрагмы из дюралюминия, на поверхности сформирован слой анодного окисла (ИФП СО РАН, Россия, 2008 г.). Подобные покрытия можно изготовить следующим образом. Например, после изготовления диафрагма подвергается электрохимическому окислению (анодированию) в водных растворах. При этом способе оксид алюминия частично растворяется в электролите и на поверхности образуется пористое оксидное покрытие толщиной в десятки микрометров. Со временем в вакууме оно изменяет цвет с чёрного на коричневый, что вызвано большим газовыделением в вакууме. Графики на всех рисунках жёлтого цвета.

8. Фрагмент диафрагмы из ковара с травлёной поверхностью (филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», Россия). Упрощённая технология травления поверхности следующая. Обезжиренную в органических растворителях диафрагму погружают в раствор концентрированной азотной кислоты при температуре 80 °С. За 15–20 мин происходит разрыхление слоя окисла ковара и его равномерное растворение. Травлённый ковар имеет невысокий коэффициент поглощения в ИК спектральном диапазоне [2].

9. Эталон серого тела (Загорский оптико-механический завод «ЗОМЗ», Россия). Интегральный коэффициент излучения 58 % в диапазоне 4–40 мкм [5].

10. Модель (эталон) чёрного тела («ЗОМЗ», Россия). Интегральный коэффициент излучения модели чёрного тела около 0,99 % в спектральном диапазоне 4–40 мкм [5].

11. Картон, который использован для измерения уровня фонового излучения в исследованиях на лабораторной установке.

12. Покрытие из взвеси графита в криогенностойком лаке (ИФП СО РАН, Россия, 2021 г.). Технология нанесения покрытия на ковар и нержавеющей сталь формируется аналогично образцу 5.

Методика проведения исследований.

Исследование спектров отражения образцов покрытий. Спектры и интегральные коэффициенты отражения в инфракрасном спектральном диапазоне были исследованы на инфракрасных фурье-спектрометрах ФТ-801 с приставками отражения ПО-15В и ПО-45Н (Россия) [6]. Основные характеристики приставок отражения приведены в табл. 1, а оптическая схема с обозначениями представлена на рис. 1.

Спектрометр ФТ-801 относится к классу модуляционных спектральных приборов, в которых разделение исследуемого излучения на спектральные составляющие производится специальной модуляцией потока излучения оптическим подвижным элементом с последующей электронно-математической обработкой сигнала оптического приёмника, регистрирующего модулированное излучение — интерферограмму относительно опорного спектра. Опорным являлся спектр отражения штатного образца сравнения (зеркало). В качестве зеркала использовалась плоская полированная стальная пластина, входящая в состав прибора ФТ-801. Погрешность измерения амплитуды эталона серого тела на длине волны 13,5 мкм составила 7 %.

Исследование спектрометром ФТ-801 отражения от образцов покрытий диафрагм. В приставку отражения (ПО) устанавливается образец сравнения (зеркало). Программно записывается его спектрограмма. После этого аналогично устанавливается исследуемый образец и программно записывается его спектрограмма. Далее в программе осуществляется обработка спектра образца относительно опорного спектра зеркала, а также сохранение спектров отражения исследуемых образцов в диапазоне 2–20 мкм в табличной форме, удобной для дальнейшей обработки данных. Программа позволяет вычислить интегральные коэффициенты отражения в диапазонах 3–5 и 8–12 мкм.

При исследовании интегральных коэффициентов отражения для углов падения ИК-излучения 15 и 45° на разных инфракрасных фурье-спектрометрах выяснено, что не

Таблица 1

Основные характеристики ПО-15В и ПО-45Н

Наименование	Угол падения центрального луча, град	Область сбора отражённого ИК-излучения в угле, град
ПО-15В	15	≈ 30
ПО-45Н	45	≈ 60

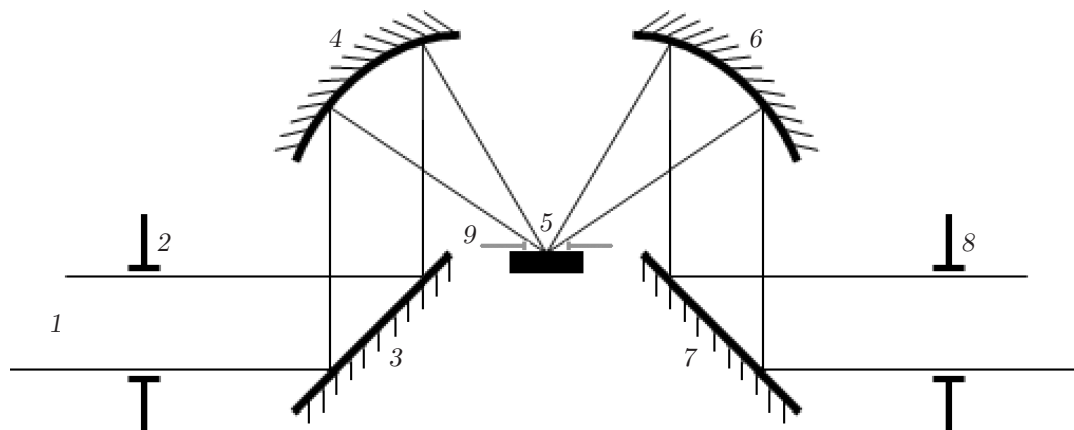


Рис. 1. Оптическая схема приставок отражения: 1 — пучок ИК-излучения, направляемый на объект исследования; 2 — входное отверстие ПО; 3, 7 — плоские зеркала; 4, 6 — параболические зеркала; 5 — поверхность исследуемого образца; 8 — выходное отверстие приставки; 9 — диафрагма

представляется возможным сравнение результатов измерения при разных диаметрах и между разными инфракрасными фурье-спектрометрами. Это обусловлено неоднородным распределением плотности ИК-излучения, проходящего через диафрагму 9. Это подтверждается сравнением результатов исследования двух образцов покрытий 2 и 5 при разных диаметрах диафрагмы 9 в ПО-15В (2 и 5 мм) и ПО-45Н (3,5 мм). Таким образом, сравнение результатов исследования образцов покрытий возможно только между собой в каждом эксперименте.

Исследование углового распределения уровней отражённого ИК-излучения от образцов покрытий диафрагм на лабораторном стенде. Блок-схема лабораторного стенда с пояснениями представлена на рис. 2.

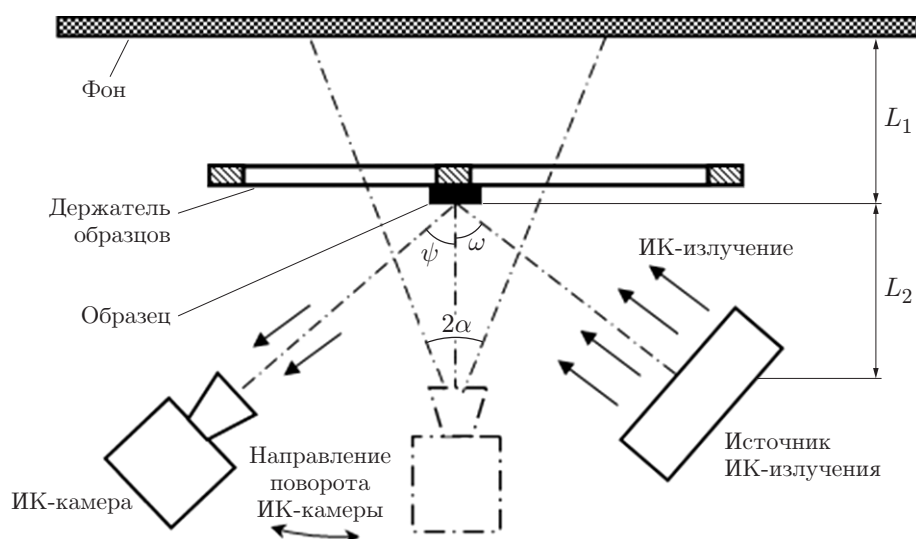


Рис. 2. Блок-схема лабораторного стенда: ω — угол расположения ИК-излучателя относительно нормали к поверхности исследуемых образцов покрытий; ψ — угол положения ИК-камеры относительно нормали; 2α — угол поля зрения ИК-камер

Таблица 2

Основные характеристики приёмников ИК-камер лабораторного стенда

Наименование характеристики приёмника ИК-камер	Epsilon MW (Франция)	Omega™, Indigo (США)
Спектральный диапазон, мкм	3,4–4,8	7,5–13,5
Размерность матрицы, пиксели	384 × 288	164 × 128
Шаг матрицы, мкм	15	51
Эквивалентная шуму разность температур, К	< 0,024	≤ 0,085
Особенности ИК-камер	Охлаждаемая	Возможность отключения автоматической регулировки усиления

Инфракрасная камера лабораторного стенда одновременно регистрировала уровни отражённого излучения от покрытия диафрагмы и фона. Параметры ИК-камер для разных спектральных диапазонов представлены в табл. 2. Вычисление уровня отражённого сигнала от поверхности диафрагмы осуществлялось относительно уровня фона. В целях создания одинаковых условий проведения исследования на держателе закреплялся только один исследуемый образец. Для одновременной регистрации уровней сигнала от исследуемого образца и фона (картон, образец 11) в держателе изготовлены прямоугольные вырезы. Расстояние между поверхностью образца и фоном составляло $L_1 \approx 0,5$ м. Источник ИК-излучения и ИК-камера устанавливались относительно исследуемого образца на расстоянии $L_2 \approx 0,45$ м. При первом измерении угол ψ между ИК-камерой и нормалью к поверхности образца составлял 0° . Положение источника ИК-излучения относительно образца было постоянным и составляло около $\omega \approx 15^\circ$. Уровень отражённого сигнала от покрытия диафрагмы и фона сохранялся в файле для дальнейшей обработки. После этого ИК-камера перемещалась по кругу на угол 10° . Снова осуществлялось сохранение уровней отражённого сигнала от образца покрытия и фона. После этого камера снова перемещалась по кругу на угол 10° . Угол максимального перемещения камеры относительно нормали к образцу составлял около 80° . Специально разработанные в «КТИПМ» программы для сохранения и обработки информации обеспечивали:

- сохранение информации с ИК-камеры (стоп-кадр или видеопоток);
- при работе с видеопотоком возможно суммирование и усреднение уровней сигнала по каждому пикселу изображения для повышения отношения сигнал/шум;
- вывод среза по выбранной строке и/или столбцу в усреднённом видеокадре для определения значений уровней исследуемого сигнала в изображении.

Источником ИК-излучения являлся кварцевый инфракрасный нагреватель АОУОЕ Int 853А. Температура источника ИК-излучения составляла 90°C при исследованиях в спектральном диапазоне 3,4–4,9 мкм и 79°C для диапазона 7,5–13,5 мкм.

При измерении отражённого излучения камерой Indigo (США) в спектральном диапазоне 7,5–13,5 мкм усиление сигнала выбрано таким, что для эталона серого тела уровень сигнала был максимальный, но не выходил за пределы динамического диапазона камеры. Для образцов с минимальными уровнями отражения от поверхности данного усиления сигнала ИК-камеры было недостаточно. Поэтому дополнительно исследованы уровни отражённых излучений от этих образцов при максимальной чувствительности камеры. Погрешность измерения значений амплитуд покрытий диафрагм составила менее 20 %.

Экспериментальные результаты.

Интегральные коэффициенты и спектры отражения покрытий диафрагм. На рис. 3

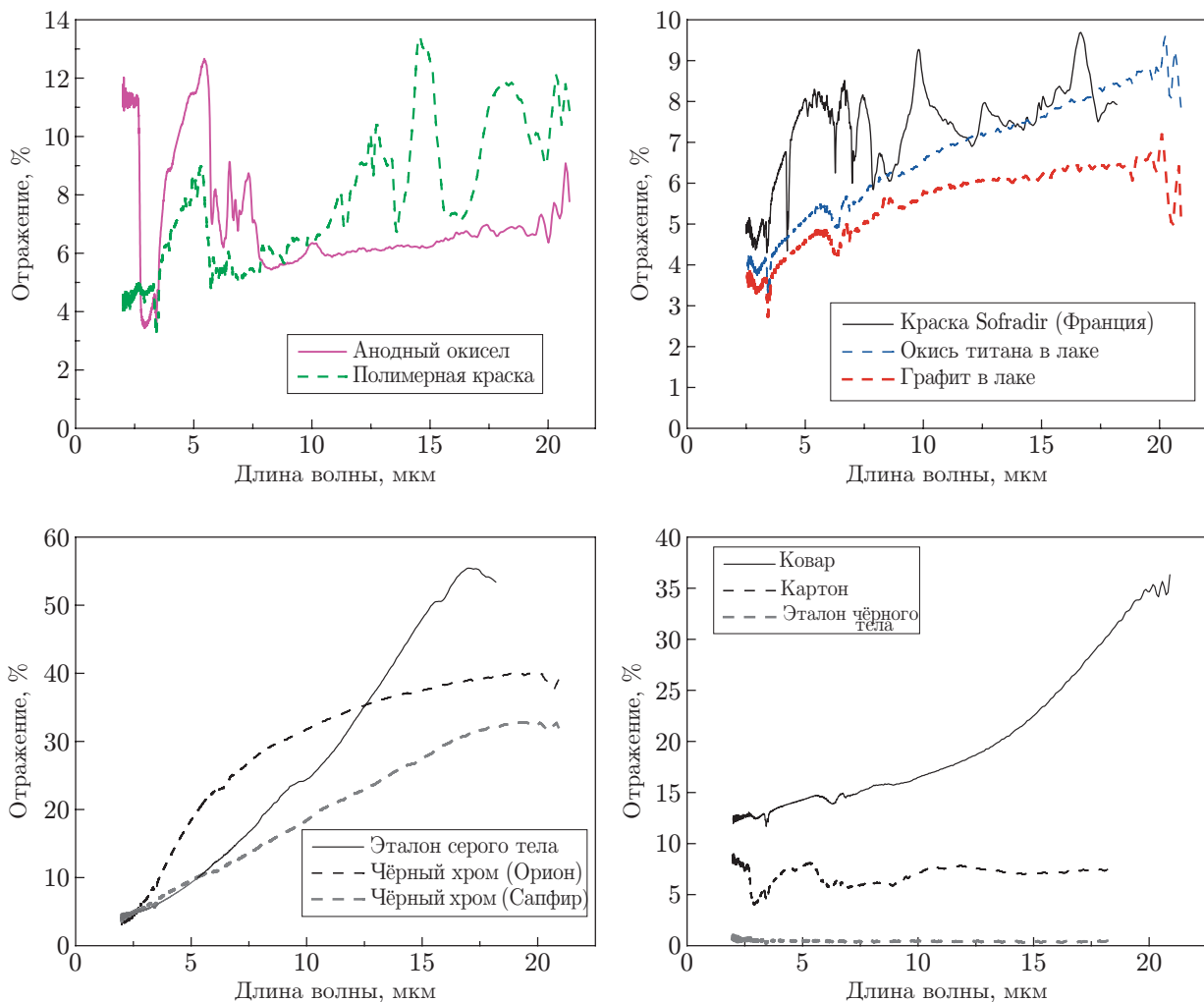


Рис. 3. Спектры отражений образцов поверхностей диафрагм, картона и эталонов серого и чёрного тел

представлены спектры отражения образцов покрытий диафрагм, картона, эталонов серого и чёрного тел, измеренные на фурье-спектрометре ФТ-801 с ПО-15В.

Значения измеренных интегральных коэффициентов отражения исследуемых образцов покрытий в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм приведены в табл. 3.

Исследование углового распределения уровней отражённого ИК-излучения от образцов покрытий диафрагм. На рис. 4 и 5 представлены уровни отражённого излучения образцов покрытий относительно угла зеркальной составляющей — угол с максимальным уровнем отражённого излучения. На рис. 4 уровни отражения ИК-излучения от образцов покрытий в спектральном диапазоне 3,4–4,8 мкм, а на рис. 5 — в спектральном диапазоне 7,5–13,5 мкм.

Обсуждение результатов измерения. Исследования фрагментов диафрагм эталонов чёрного и серого тел позволили объективно оценить результаты. Образцы покрытий диафрагм с уровнем отражения меньше эталона серого тела.

Спектральный диапазон 3–5 мкм:

— интегральный коэффициент отражения образцов покрытий 1, 4, 5 и 6 при углах падения излучения 15 и 45° меньше, чем у эталона серого тела (7,09 %), наименьший ин-

Таблица 3

Интегральные коэффициенты отражения образцов покрытий диафрагм, картона и эталонов серого и чёрного тел

№ образца	Интегральные коэффициенты отражения, %					
	Спектральный диапазон 3–5 мкм			Спектральный диапазон 8–12 мкм		
	ПО-15В		ПО-45Н Ø3,5 мм	ПО-15В		ПО-45Н Ø3,5 мм
	Ø2 мм	Ø5 мм		Ø2 мм	Ø5 мм	
1	6,33	—	4,22	6,83	—	3,45
2	12,3	11,69	16,59	31,84	31,45	32,02
3	7,67	—	8,22	18,49	—	17,69
4	4,46	—	2,23	6,57	—	3,63
5	3,98	0,64	0,94	5,69	0,65	0,92
6	7,08	—	4,19	7,06	—	5,2
7	8,2	—	11,06	5,88	—	2,9
8	13,3	—	—	16,66	—	—
9	7,09	—	—	24,98	—	—
10	0,46	—	—	0,42	—	—
11	6,47	2,33	—	6,95	1,51	—
12	5,03	—	—	6,88	—	—

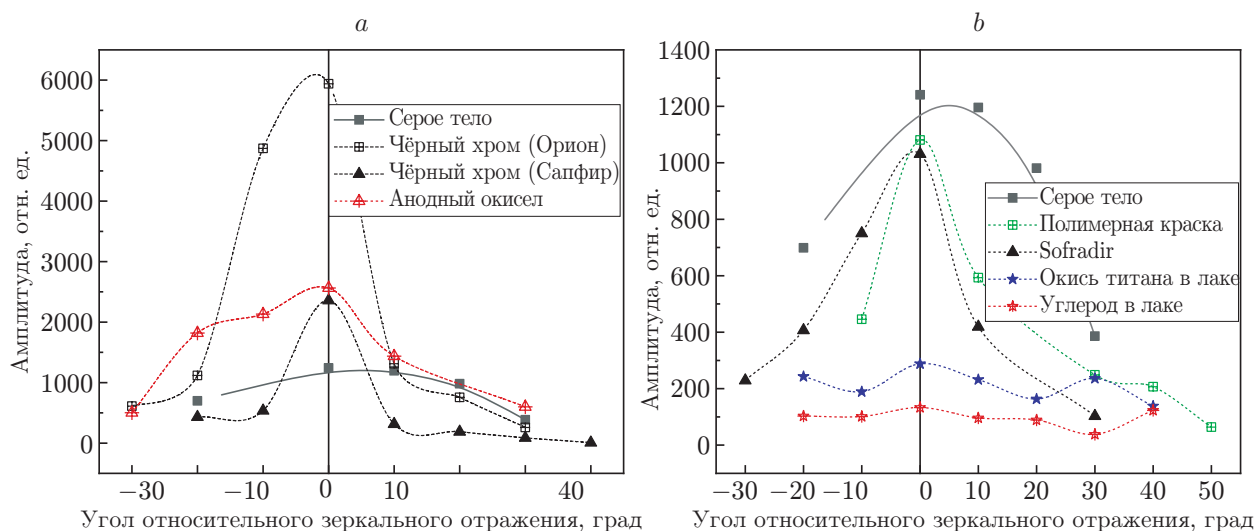


Рис. 4. Уровни отражённого излучения относительно угла зеркальной составляющей для спектрального диапазона 3,4–4,8 мкм: *a* — образцы покрытий с уровнем сигнала отражённого излучения, большим, чем у образца серого тела; *b* — образцы с уровнем сигнала отражённого излучения, меньшим, чем у образца серого тела

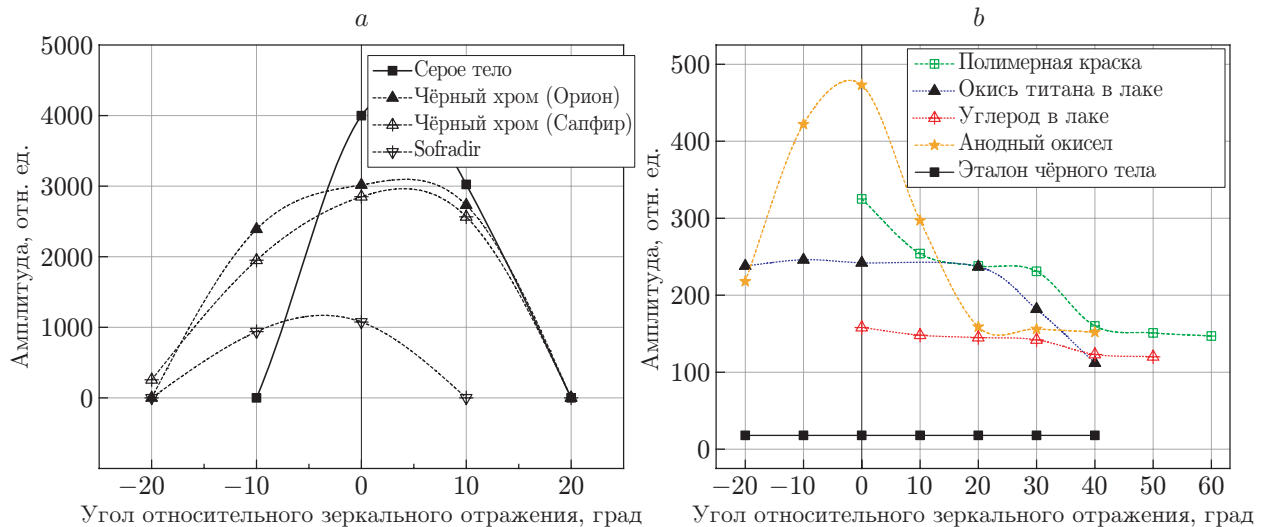


Рис. 5. Уровни отражённого излучения относительно угла зеркальной составляющей для спектрального диапазона 7,5–13,5 мкм: образцы покрытий с большими уровнями отражённого излучения (а); образцы с минимальными уровнями отражения от поверхности ИК-излучения (б)

тегральный коэффициент отражения образца 5 (взвесь графита в криогенном лаке 3,98 %, для сравнения эталон чёрного тела 0,46 %);

— измерение угловых распределений в диапазоне 0–80°, наилучшие образцы покрытий 4, 5 и 6, причём образцы 4 и 5 имеют отражение без явно выраженного пика зеркального отражения.

Спектральный диапазон 8–12 мкм:

— интегральный коэффициент отражения образцов покрытий 1, 3, 4–8 при углах падения центрального луча 15 и 45° меньше, чем у эталона серого тела (24,98 %), наименьший интегральный коэффициент отражения образца 5 — 5,69 % (эталон чёрного тела — 0,42 %);

— измерение угловых распределений в диапазоне 0–80°, образцы покрытий 1, 4, 5 и 7 обладают лучшими характеристиками, чем остальные.

Заключение. Анализируя результаты проведённых исследований, можно сделать заключение, что из отобранных образцов покрытий (1, 4, 5 и 7) наилучшие результаты имеет покрытие 5 — взвесь порошкового графита в криогенностойком лаке (разработка филиала ИФП СО РАН «КТИПМ»).

Незначительное увеличение массы диафрагмы после нанесения покрытия (не более 5 мг на 1 см² напыляемой площади) практически не влияет на время охлаждения фотоприёмников до рабочих температур, так как масса покрытия на два порядка меньше массы диафрагмы.

В настоящее время технологию нанесения покрытия из взвеси графита в криогенностойком лаке применяют в ИФП СО РАН (образец 12) для нанесения покрытий на поверхности диафрагм фотоприёмных устройств тепловизионных приборов и данное покрытие используется в тёплых диафрагмах [7].

Благодарности. Авторы выражают благодарность А. В. Бубликову (научно-производственная фирма «СИМЕКС») за предоставленную возможность провести измерения с помощью специальной приставки отражения ПО-45Н в составе прибора ФТ-801; Л. С. Марченко (филиал ИФП СО РАН «КТИПМ») за помощь в подготовке образцов покрытий диафрагм для исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2571171 С1 РФ. ИК матричный фотоприёмник с охлаждаемой диафрагмой и способ изготовления диафрагмы /З. Н. Ефимова, И. В. Ефимов, Н. Г. Мансветов, П. В. Власов, А. А. Лопухин, Л. В. Киселева, А. В. Савостин. Опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35. 14 с.
2. Добровольский П. П., Марченко Л. С., Алдохин П. А. Исследование спектральных характеристик различных покрытий поглощающих ИК-излучение // Сб. матер. XI науч. конгресса “ГЕО-СИБИРЬ – 2015”. Новосибирск: СГГА, 2015. Т. 1. С. 241–245.
3. Салин В. И. Калибровочный излучатель космического сканирующего ИК радиометра // Оптический журнал. 1998. 65, № 5. С. 101–103.
4. Пат. 2503103 С1 РФ. Способ изготовления поглощающего материала /А. А. Жуков, А. С. Корпухин, В. П. Лаврицев, О. А. Дюкарева, О. Ю. Казанцев. Опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. 8 с.
5. Терморadiометр ТРМ «И». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Московская обл.: типография Загорского оптико-механического завода “ЗОМЗ”, 1988. 36 с.
6. ИК фурье-спектрометр «ФТ-801». Руководство по эксплуатации. Новосибирск: ООО Научно-производственная фирма «СИМЕКС», 2014. 28 с.
7. Добровольский П. П., Кремис И. И., Хрящев С. В. и др. Применение тёплой апертурной диафрагмы в охлаждаемых малоформатных матричных фотоприёмниках // Автометрия. 2020. 56, № 6. С. 120–124. DOI: 10.15372/AUT20200613.

Поступила в редакцию 20.02.2021

После доработки 27.03.2021

Принята к публикации 07.04.2021
